

星载 SAR 原始数据压缩引起的目标辐射误差机理研究

李 信^{*①②③} 祁海明^{①②} 华 斌^{①②} 雷 宏^① 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 目标的辐射误差是影响 SAR 图像质量的重要因素。该文提出了一种解析求解 SAR 原始数据分块自适应量化引起的目标辐射误差的方法。该方法考虑系统热噪声的影响,采用符号函数描述分块自适应量化过程,并通过第 1 类贝塞尔函数恒等式将回波相位分解为倍频项叠加,经过频域匹配滤波最终推导出目标辐射误差的解析表达式。该文仿真了在已知热噪声条件下,不同幅度的单点和多点目标回波分别采用 8:4, 8:3, 8:2, 8:1 压缩比压缩时引起的辐射误差,验证了解析表达式的正确性。该文的分析结果为星载 SAR 系统原始数据压缩方案的选择及地面辐射校正处理提供了重要的理论参考。

关键词: 合成孔径雷达; 分块自适应量化; 符号函数; 第 1 类贝塞尔函数; 辐射误差

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)08-1845-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01394

Theoretical Analysis on Target Radiometric Error Resulting from Spaceborne SAR Raw Data Compression

Li Xin^{①②③} Qi Hai-ming^{①②} Hua Bin^{①②} Lei Hong^① Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Target radiometric error deteriorates SAR image quality. A method is proposed in this paper to analyze theoretically target radiometric error resulting from SAR Block Adaptive Quantization (BAQ). Meanwhile, thermal noise is taken into consideration. During the analysis, first, the process of BAQ is described by sign function. Second, the output signal from BAQ is expanded into harmonics by Bessel function of first kind. Third, the harmonics are processed by matched filter in frequency domain, and finally the analytical expression of target radiometric error is obtained as expected. Numerical experiments of single point target and multi-point targets with thermal noise are implemented to verify this method, and BAQ compression ratios in the experiments are 8:1, 8:2, 8:3 and 8:4. Analytical results derived in this paper could be quite useful for the decision of BAQ compression ratio and the process of target radiometric correction.

Key words: SAR; Block Adaptive Quantization (BAQ); Sign function; Bessel function of first kind; Radiometric error

1 引言

受星上存储容量以及下传数据率的限制,原始数据在下传之前需要进行有损压缩^[1]。压缩比越高,量化噪声越大,信息量损失越多。目前工程上普遍采用的压缩算法为 BAQ (Block Adaptive Quantization)^[1-5]。Radarsat-2^[3], Envisat ASAR^[4], TerraSAR-X 和 TanDEM-X^[6,7]均采用了多种压缩比

的 BAQ 来满足不同工作模式的性能要求。

虽然 BAQ 算法已在诸多系统中采用,但压缩比的选择仍主要基于大量的仿真实验。文献[6,8]通过仿真实验得出了不同压缩比 BAQ 对原始数据信噪比的影响;文献[9]采用解析的方法得到了同样的结论,但二者都只是在原始数据域对 BAQ 压缩算法进行评估。文献[4,6,10-12]在图像域通过数值实验分别分析了 BAQ 压缩对辐射分辨率、动目标检测、干涉测高以及图像动态范围的影响,但均未给出解析表达式。因此,从理论上定量评估不同压缩比对 SAR 图像质量以及后续应用的影响,进而指导实际

2010-12-23 收到, 2011-03-21 改回

中国科学院优秀博士论文院长奖获得者专项基金(0813260042)和微波成像技术国家重点实验室基金(9140C1903041003)资助课题

*通信作者: 李信 sherry_lixin@yahoo.com.cn

应用中压缩比的选择仍是亟待解决的难题。

本文深入研究了星载 SAR 原始数据压缩引起的目标辐射误差机理,建立了原始数据压缩并成像的数学模型,提出了一种解析求解星载 SAR 原始数据压缩引起的目标辐射误差的方法,进而从图像辐射特性的角度为压缩比的选择提供理论参考。

2 SAR 原始回波表达式

在低斜视角、中等孔径情况下,将 SAR 原始回波解调到基带,假设目标的距离单元徙动均已进行精确校正,可以近似认为目标的距离向和方位向回波相互独立,不存在耦合。若忽略天线方向图加权,则 $M \times N$ 个目标点的场景回波表达式为^[13]

$$S(\tau, \eta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \text{rect}\left[\frac{(\tau - \tau_{ij})}{T_r}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{(\eta - \eta_{ij})}{T_a}\right] \exp\left\{j\pi k_r (\tau - \tau_{ij})^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi k_a (\eta - \eta_{ij})^2\right\} \cdot \exp\{-j4\pi f_0 R_0 / c\} \quad (1)$$

其中 A_{ij} 为目标点的后向散射系数; T_r, T_a 分别为脉冲宽度和综合孔径时间; k_r, k_a 分别为距离向和方位向调频率; τ_{ij}, η_{ij} 分别为不同位置目标点的回波延时以及多普勒中心延时。为了方便分析,忽略式(1)中的最后一项常数相位,令 $\theta_{ij}(\tau)$ 和 $\varphi_{ij}(\eta)$ 分别为距离、方位向相位,则式(1)可化简为

$$S(\tau, \eta) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \exp\left\{j[\theta_{ij}(\tau) + \varphi_{ij}(\eta)]\right\} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \exp\left\{j\phi_{ij}(\tau, \eta)\right\} \quad (2)$$

假设存在系统热噪声,服从均值为 0, 标准差为 σ_n 的高斯分布,且与回波信号统计独立。由于 I/Q 两路叠加的系统热噪声具有相同的统计特性,最终评估指标也主要考虑统计平均特性,因此为了方便分析计算, I/Q 两路统一采用 n 表示噪声。其概率密度函数为

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left\{-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad (3)$$

SAR 原始回波在 BAQ 压缩前,首先应对回波的实虚部分别进行归一化,归一化因子为

$$\text{norm} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij}^2 + \sigma_n^2} \quad (4)$$

则叠加热噪声的归一化回波表达式为

$$NS_r(\tau, \eta) = \frac{1}{\text{norm}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \cos[\phi_{ij}(\tau, \eta)] + n \right\} + \frac{j}{\text{norm}} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N A_{ij} \sin[\phi_{ij}(\tau, \eta)] + n \right\} \quad (5)$$

3 BAQ 压缩的符号函数表示

由傅里叶反变换,符号函数可以表示为^[14,15]

$$\text{sgn}(x) = -\frac{j}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega x}}{\omega} d\omega \quad (6)$$

对 I/Q 两路回波信号分别进行 BAQ 压缩,以 8:2 压缩比为例,假设归一化输入信号为 x , 则量化输出信号 y_2 可以用符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 表示如下:

$$y_2 = a_{21} \times \text{sgn}(x) + \frac{(a_{22} - a_{21})}{2} \cdot [\text{sgn}(x - b_{22}) + \text{sgn}(x + b_{22})] \quad (7)$$

其中 a_{ni} 和 b_{ni} 分别为 2 bit 压缩对应的量化电平和归一化门限电平。同理可以得到 8:1, 8:3, 8:4 BAQ 的量化输出信号表达式。

4 回波 BAQ 压缩并成像的解析推导

假设沿距离向存在 N 点目标,相邻目标间隔一个距离分辨单元,不考虑过采样,线性调频信号脉冲持续时间内包含的采样点数为 L , 则 N 个目标沿距离向的回波采样点数为 $N + L - 1$ 。在某一方位时刻, $N \leq L$ 的回波叠加示意图如图 1 所示。

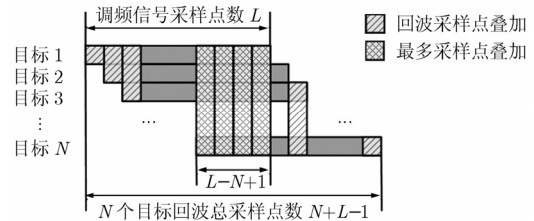


图 1 $N \leq L$ 时的回波叠加示意图

假设每一个采样点对应的采样时刻为 τ_i , $\tau_{i+1} - \tau_i = 2\rho_r / c = \Delta\tau$, 其中 ρ_r 为斜距分辨率, $i = 1, 2, \dots, N + L - 1$, 则叠加的回波沿距离向每个采样时刻的值可以表示为

$$S_N(\tau_i, \eta) = \begin{cases} \sum_{k=1}^i A_k \exp\{j\phi[\tau - (k-1)\Delta\tau, \eta]\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & i < N \\ \sum_{k=1}^N A_k \exp\{j\phi[\tau - (k-1)\Delta\tau, \eta]\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & N \leq i \leq L \\ \sum_{k=i-L+1}^N A_k \exp\{j\phi[\tau - (k-1)\Delta\tau, \eta]\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & i > L \end{cases} \quad (8)$$

4.1 回波 BAQ 压缩的贝塞尔函数展开

第 1 类贝塞尔函数恒等式^[16]:

$$\begin{aligned} \exp\{jx \cos \theta\} &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} j^m J_m(x) \exp(jm\theta) \\ &= \sum_{m=0}^{+\infty} \varepsilon_m j^m J_m(x) \cos(m\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $J_m(x)$ 表示 m 阶第 1 类贝塞尔函数, 当 $m = 0$ 时, $\varepsilon_m = 1$; 当 $m \neq 0$ 时, $\varepsilon_m = 2$ 。则叠加热噪声的归一化多点目标回波实部经符号函数处理可以展开如下:

$$\begin{aligned} &\text{sgn}\{\text{Re}[NS_N(\tau_i, \eta)]\} \\ &= \begin{cases} -\frac{j}{\pi} \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_i=0}^{+\infty} \left\{ j^{m_1+\dots+m_i} \cdot \left(\prod_{k=1}^i \varepsilon_{m_k} \right) \right. \\ \quad \cdot \left. \left(\prod_{k=1}^i \cos \phi_{1_{m_k}} \right) \cdot C1_1^i \right\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & i < N \\ -\frac{j}{\pi} \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ j^{m_1+\dots+m_N} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \right. \\ \quad \cdot \left. \left(\prod_{k=1}^N \cos \phi_{1_{m_k}} \right) \cdot C1_1^N \right\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & N \leq i \leq L \\ -\frac{j}{\pi} \sum_{m_{i-L+1}=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ j^{m_{i-L+1}+\dots+m_N} \cdot \left(\prod_{k=i-L+1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \right. \\ \quad \cdot \left. \left(\prod_{k=i-L+1}^N \cos \phi_{1_{m_k}} \right) \cdot C1_{i-L+1}^N \right\} \cdot \delta(\tau - \tau_i), & i > L \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\phi_{1_{m_k}} = m_k \phi[\tau - (k-1)\Delta\tau, \eta] \quad (11)$$

$$C1_p^q = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\prod_{k=p}^q J_{m_k} \left(\frac{\omega A_k}{\text{norm}} \right) \cdot e^{j\omega n / \text{norm}}}{\omega} d\omega \quad (12)$$

由上式可以看出, 回波经符号函数处理会产生很多倍频项, 且每一项的系数与相应阶数的贝塞尔函数积分有关。以 8:2 BAQ 压缩为例, 考虑最多采样点叠加的采样时刻, 即 $N \leq i \leq L$, 压缩后回波沿距离向采样值的实部和虚部表达式为

$$\begin{aligned} &\text{Re}[NS_{2 \text{ bit}}(\tau_i, \eta)] \\ &= \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ j^{m_1+\dots+m_N+3} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \left(\prod_{k=1}^N \cos \phi_{1_{m_k}} \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \left[a_{21} / \pi \cdot C1_1^N + (a_{22} - a_{21}) / (2\pi) \cdot C2_1^N \right] \right\} \\ &\quad \cdot \delta(\tau - \tau_i) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &\text{Im}[NS_{2 \text{ bit}}(\tau_i, \eta)] \\ &= \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ j^{m_1+\dots+m_N+3} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \left(\prod_{k=1}^N \cos \phi_{2_{m_k}} \right) \right. \\ &\quad \left. \left[a_{21} / \pi \cdot C1_1^N + (a_{22} - a_{21}) / (2\pi) \cdot C2_1^N \right] \right\} \\ &\quad \cdot \delta(\tau - \tau_i) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\phi_{2_{m_k}} = m_k \phi[\tau - (k-1)\Delta\tau, \eta] - m_k \pi / 2 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} &C2_p^q \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\prod_{k=p}^q J_{m_k} \left(\frac{\omega A_k}{\text{norm}} \right) \cdot \left[e^{j\omega(n/\text{norm}+b_{22})} + e^{j\omega(n/\text{norm}-b_{22})} \right]}{\omega} \\ &\quad \cdot d\omega \end{aligned} \quad (16)$$

4.1.1 对噪声的处理 贝塞尔函数积分项 $C1_p^q$ 和 $C2_p^q$ 中包含的噪声 n 为具有高斯统计特性的随机变量, 为了方便计算, 对噪声取期望值处理^[14,15], 令

$$\begin{aligned} \langle C1_p^q \rangle &= \int_0^{+\infty} \frac{\prod_{k=p}^q J_{m_k} \left(\frac{\omega A_k}{\text{norm}} \right)}{\omega} \\ &\quad \cdot \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(\frac{j\omega n}{\text{norm}}\right) \cdot \frac{\text{norm}}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \cdot \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right) dn \right] d\omega \\ &= \begin{cases} 2 \int_0^{+\infty} \frac{\prod_{k=p}^q J_{m_k} \left(\frac{\omega A_k}{\text{norm}} \right) \cdot e^{-\frac{\omega^2 \sigma_n^2}{2\text{norm}^2}}}{\omega} d\omega, & m_p + \dots + m_q \text{ 为奇数} \\ 0, & m_p + \dots + m_q \text{ 为偶数} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \langle C2_p^q \rangle &= \begin{cases} 4 \int_0^{+\infty} \frac{\prod_{k=p}^q J_{m_k} \left(\frac{\omega A_k}{\text{norm}} \right) \cdot \cos(\omega b_{22}) \cdot e^{-\frac{\omega^2 \sigma_n^2}{2\text{norm}^2}}}{\omega} \\ \quad \cdot d\omega, & m_p + \dots + m_q \text{ 为奇数} \\ 0, & m_p + \dots + m_q \text{ 为偶数} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

4.1.2 相位项展开 将式(13)中的 \cos 项进行积化和差, 展开结果如下:

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^N \cos \phi_{1_{m_k}} &= \frac{1}{2^{N-1}} \sum_{l=1}^{2^{N-1}} \cos\{v_1 \cdot \pi k_r \tau^2 - v_2 \\ &\quad \cdot \pi k_r \tau \Delta\tau + v_3 \cdot \pi k_r \Delta\tau^2 + v_1 \cdot \phi_a(\eta)\} \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$v_1 = \sum_{k=1}^N (-1)^{\lfloor \frac{l-1}{2^{N-k}} \rfloor} \cdot m_k \quad (20)$$

$$v_2 = \sum_{k=1}^N 2(k-1) \cdot (-1)^{\lfloor \frac{l-1}{2^{N-k}} \rfloor} \cdot m_k \quad (21)$$

$$v_3 = \sum_{k=1}^N (k-1)^2 \cdot (-1)^{\lfloor \frac{l-1}{2^{N-k}} \rfloor} \cdot m_k \quad (22)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整数。同理可得式(14)中的 \cos 项展开

结果为

$$\prod_{k=1}^N \cos \phi_{2m_k} = \frac{1}{2^{N-1}} \sum_{l=1}^{2^{N-1}} j^{v_1-1} \cdot \sin \left\{ v_1 \cdot \pi k_r \tau^2 - v_2 \cdot \pi k_r \tau \Delta \tau + v_3 \cdot \pi k_r \Delta \tau^2 + v_1 \cdot \phi_a(\eta) \right\} \quad (23)$$

令

$$\phi(l, k, m_k, \tau, \eta) = v_1 \cdot \pi k_r \tau^2 - v_2 \cdot \pi k_r \tau \Delta \tau + v_3 \cdot \pi k_r \Delta \tau^2 + v_1 \cdot \phi_a(\eta) \quad (24)$$

即为 2 bit BAQ 压缩后, 各回波分量的相位表达式。其中 v_1 表征匹配项和倍频项; v_2 表征目标回波延时与虚假目标延时; v_3 表征常数相位。

将式(17)-式(19), 式(23), 式(24)代入式(13)和式(14), 2 bit BAQ 压缩归一化结果的复数形式为

$$NS_{2 \text{ bit}}(\tau_i, \eta) = \sum_{m_1=0}^{+\infty} \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ \frac{j^{m_1+\dots+m_N+3}}{2^{N-1}} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \sum_{l=1}^{2^{N-1}} \exp \left\{ j^{v_1} \cdot \phi(l, k, m_k, \tau, \eta) \right\} \cdot \left[\frac{a_{21}}{\pi} \langle C1_1^N \rangle + \frac{a_{22} - a_{21}}{2\pi} \langle C2_1^N \rangle \right] \cdot \delta(\tau - \tau_i) \right\} \quad (25)$$

其中 $m_1 + \dots + m_N$ 为奇数, $N \leq i \leq L$ 。其他压缩比的压缩结果同理可得。

4.2 RD 算法成像处理

仍以 8:2 BAQ 压缩为例, 根据驻定相位原理, 将压缩后回波变换到频域进行匹配滤波^[13], 当 $v_1 = 1$ 时, 回波相位与滤波器相位匹配; 对于 $v_1 \neq 1$ 的失配项, 成像时无匹配滤波增益, 且受贝塞尔函数积分项影响而衰减, 因此, 研究目标的峰值幅度变化, 失配项可以忽略不计。假设未压缩点目标的匹配滤波增益为 G , 忽略常数相位, 2 bit BAQ 压缩后的匹配项成像结果为

$$I_{2 \text{ bit}}(\tau_i, \eta) = \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ \frac{j^{m_1+\dots+m_N+3}}{2^{N-1}} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \sum_{l=1}^{2^{N-1}} p_r(\tau - v_2 \Delta \tau / 2) \cdot p_a(\eta) \cdot \left[\frac{a_{21}}{\pi} \langle C1_1^N \rangle + \frac{a_{22} - a_{21}}{2\pi} \langle C2_1^N \rangle \right] \cdot G \cdot \text{norm} \right\} \cdot \delta(\tau - \tau_i) \quad (26)$$

其中 $p_r(\tau)$ 和 $p_a(\tau)$ 分别为距离向和方位向脉冲压缩后的 sinc 函数包络, $v_2/2$ 表征目标点的位置, 当其超过目标点的延时范围时, 产生虚假目标。

5 压缩引起的目标辐射误差

由式(26)可以看出, 压缩算法的量化电平、归一化因子以及贝塞尔函数积分项 $\langle C1_p^q \rangle$ 和 $\langle C2_p^q \rangle$ 决定了每个目标点由原始数据压缩产生的辐射误差, 且该辐射误差与一个脉冲时间内的相邻目标幅度密切相关。

仍以 2 bit BAQ 为例, 沿距离向存在 N 点目标, 假设某一后向散射系数为 A_M 的目标点的回波延时为 $M\Delta\tau$, 则该目标点压缩后的峰值幅度为满足条件 $v_1 = 1, v_2 = 2M$ 的各匹配项的叠加, 表达式为

$$A_{M-2 \text{ bit}} = \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left\{ \frac{j^{m_1+\dots+m_N+3}}{2^{N-1}} \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \left[\frac{a_{21}}{\pi} \langle C1_1^N \rangle + \frac{a_{22} - a_{21}}{2\pi} \langle C2_1^N \rangle \right] \cdot G \cdot \text{norm} \right\} \quad (27)$$

首先计算出满足条件 $v_1 = 1$ 和 $v_2 = 2M$ 的 m_k ($k = 1, \dots, N; m_k = 0, 1, \dots, \infty$) 的各种排列组合, 将这些排列组合代入贝塞尔函数积分项求解相应的 $\langle C1_1^N \rangle$ 和 $\langle C2_1^N \rangle$, 再将结果代入式(27)即可得到目标点压缩后的峰值幅度。因此, 2 bit BAQ 压缩引起的目标辐射误差为

$$A_{M-err}[\text{dB}] = 20 \lg \left[A_{M-2 \text{ bit}} / (G \cdot A_M) \right] = 20 \lg \left\{ \sum_{m_1=0}^{+\infty} \dots \sum_{m_N=0}^{+\infty} \left[\frac{j^{m_1+\dots+m_N+3}}{2^{N-1}} \cdot A_M \cdot \left(\prod_{k=1}^N \varepsilon_{m_k} \right) \cdot \left[\frac{a_{21}}{\pi} \langle C1_1^N \rangle + \frac{a_{22} - a_{21}}{2\pi} \langle C2_1^N \rangle \right] \cdot \text{norm} \right] \right\} \quad (28)$$

其他压缩比引起的辐射误差同理可得。

6 仿真结果及分析

本节将通过不同幅度的单点目标和 3 点目标的模拟仿真实验对解析公式进行验证, 仿真流程如图 2 所示。仿真中, BAQ 压缩比分别采用 8:4, 8:3, 8:2 和 8:1, 回波的脉冲持续时间 $T_r = 10 \mu\text{s}$, 距离向调频率 $k_r = 10^{13} \text{ Hz/s}$, 综合孔径时间 $T_a = 3.2 \text{ s}$, 方位向调频率 $k_a = 130.56 \text{ Hz/s}$, 系统热噪声标准差 σ_n 为 2.5。

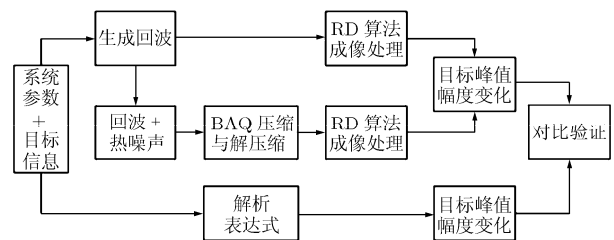


图2 仿真流程图

6.1 单点目标

根据式(28)，图3给出了幅值A由1变化到7，间隔0.5的单点目标采用不同BAQ压缩比引起的峰值幅度变化理论曲线，并通过图2所示的仿真流程对理论结果进行验证。

从图3中可以看出，模拟仿真结果与理论结果吻合较好，验证了解析公式的正确性。BAQ压缩比越高，峰值幅度衰减越大；在同一BAQ压缩比下，强目标峰值幅度衰减小于弱目标的峰值幅度衰减。

6.2 3点目标

假设沿距离向有3个相邻的目标点 A_1, A_2, A_3 ，分两种情况进行讨论：(1)幅度不等，两侧目标点幅度 $A_1 = A_3 = 3.5$ ，中间目标点幅度 A_2 由1变化到7，间隔0.5；(2)幅度相等， A_1, A_2, A_3 均由1变化到7，间隔0.5。研究中间目标点 A_2 在相邻目标点影响下BAQ压缩后的幅度变化。由于各匹配分量的贝塞尔积分结果随阶数增加而衰减，为了方便计算，忽略贝塞尔积分结果小于 10^{-6} 的匹配分量。如图4所示为采用不同压缩比时， A_2 的峰值幅度变化理论曲线以及模拟仿真验证结果。

图4中理论结果与模拟仿真结果仍能较好的吻合。对比分析图3和图4，采用8:4和8:3 BAQ时， A_2 衰减均小于0.5 dB，受相邻目标点影响较小；但对于8:1和8:2 BAQ压缩，相邻目标点的存在会增加 A_2 峰值幅度的衰减，且幅度不等与幅度相等时的变化趋势相反，下面通过解析表达式(28)对该结果进行分析。

A_2 的峰值幅度衰减与满足条件 $v_1 = 1$ 和 $v_2 = 4$ 的各匹配分量 (m_1, m_2, m_3) 的贝塞尔积分以及 norm/A_2 相关。BAQ压缩比为8:1和8:2时，匹配分量的贝塞尔积分项为 $\langle C1_1^3 \rangle$ 和 $\langle C2_1^3 \rangle$ ，主要匹配分

量为 $(0,1,0)$ 和 $(1,1,1)$ ，则 norm/A_2 ，主要匹配分量的 $\langle C1_1^3 \rangle$ 和 $\langle C2_1^3 \rangle$ 在目标幅度不等和相等时的变化趋势如图5所示。

图5中，交叉点处为 $A_1 = A_2 = A_3 = 3.5$ 。 norm/A_2 与贝塞尔积分项的变化趋势相反，最终峰值幅度衰减的趋势为二者共同作用的结果，对于8:1 BAQ，变化趋势决定性因子为 $\lg \frac{\text{norm}}{A_2}$

$\cdot \sum_{m_1} \sum_{m_2} \sum_{m_3} \langle C1_1^3 \rangle$ ，其变化规律如图6所示。

从图6中可以看出，对于8:1 BAQ，中间目标点峰值幅度衰减在两种情况下的变化趋势恰好相反，与图4中的仿真结果相吻合。8:2 BAQ的结果分析同理可得。

7 结束语

本文采用符号函数和第1类贝塞尔函数恒等式推导出了BAQ压缩引起的目标辐射误差的解析表达式，进而可以从误差机理上理解BAQ压缩对目标辐射特性的影响。BAQ压缩比越大，目标峰值幅度衰减越大；单点目标采用相同压缩比时，强目标的峰值幅度衰减小于弱目标；采用8:4和8:3 BAQ时，目标峰值幅度衰减小于0.5 dB，受相邻目标影响较小；采用8:2和8:1 BAQ时，目标峰值幅度衰减受相邻目标的影响较大。

然而本文推导的解析公式在计算时仍存在一定的局限性，当目标点数较多时，匹配分量的个数较多，会导致贝塞尔积分运算量过大；由于文中未考虑ADC的影响，回波较弱以及数据饱和时结果会存在一定偏差。作者也将在今后的研究中对上述问题做进一步完善。

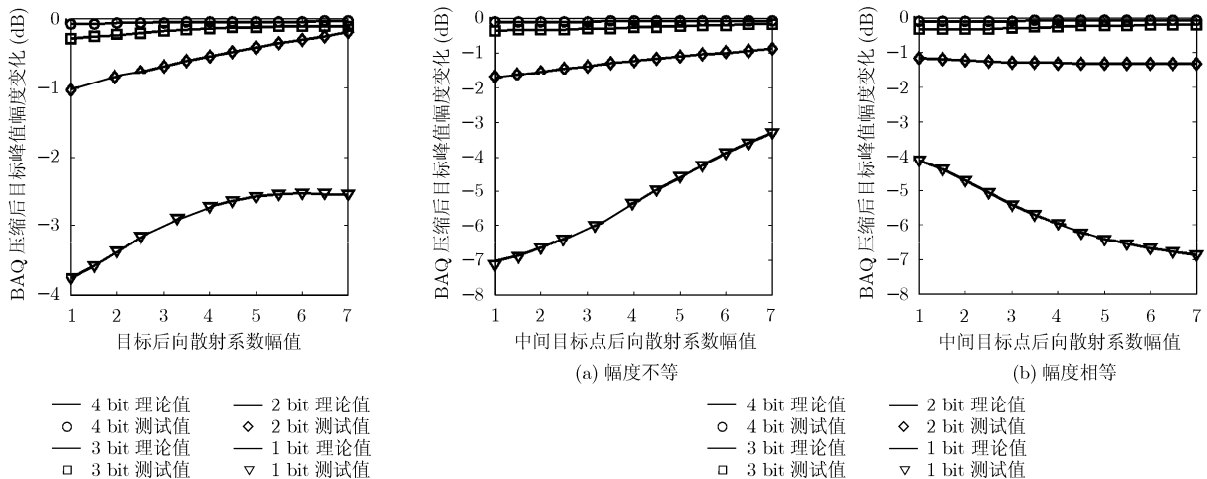


图3 单点目标 BAQ 压缩后的峰值幅度变化曲线

图4 目标 A_2 BAQ 压缩后的峰值幅度变化曲线

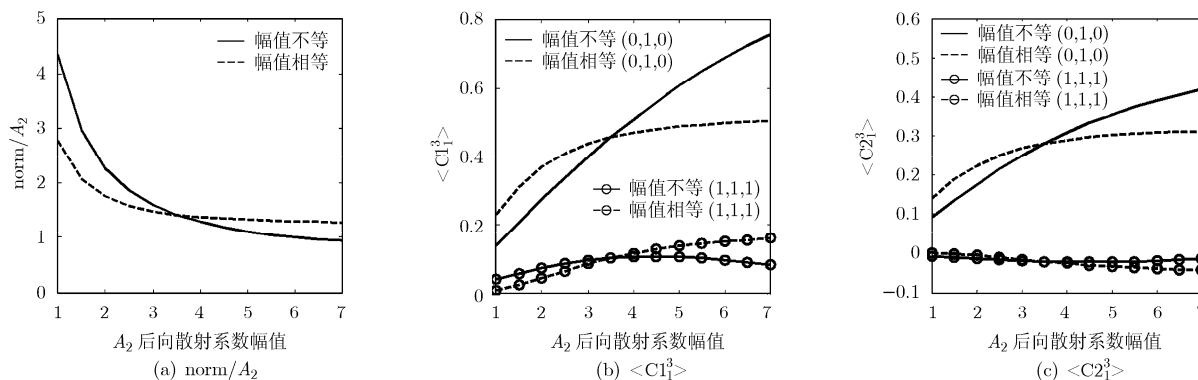
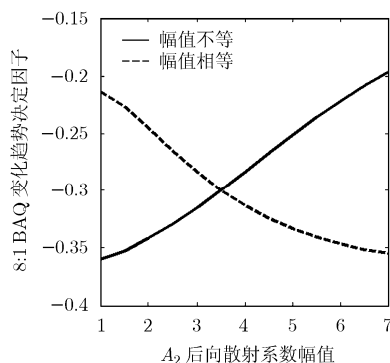
图5 A_2 峰值幅度衰减影响因素

图6 8:1 BAQ 变化趋势决定因子

参考文献

- [1] Kwok R and Johnson W T. Block adaptive quantization of Magellan SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(4): 375-383.
- [2] Qi Hai-ming and Yu Wei-dong. Anti-saturation block adaptive quantization algorithm for SAR raw data compression over the whole set of saturation degree[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(8): 1003-1009.
- [3] MacDonald, Dettwiler, Associates Ltd. Radarsat-2 Product Format Definition. 2008.
- [4] McLeod I H, Cumming I G, and Seymour M S. Envisat ASAR data reduction: impact on SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 589-602.
- [5] Qi Hai-ming, Yu Wei-dong, and Chen Xi. Piecewise linear mapping algorithm for SAR raw data compression[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2008, 51(12): 2126-2134.
- [6] Mittermayer J, Younis M, Metzger R, et al. TerraSAR-X system performance characterization and verification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 660-676.
- [7] Huber S and Krieger G. TanDEM-X mission: overview and interferometric performance[C]. Proceedings of the 6th European Radar Conference, Rome, Italy, 2009: 25-28.
- [8] Younis M, Boer J, Ortega C, et al. Determining the

optimum compromise between SAR data compression and radiometric performance an approach based on the analysis of TerraSAR-X data[C]. IGARSS. IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, 2008, 3: 107-110.

- [9] Li Xin, Qi Hai-ming, Hua Bin, et al. A study of spaceborne SAR raw data compression error based on a statistical model of quantization interval transfer probability[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2010, 53(11): 2352-2362.
- [10] 行坤, 邓云凯, 祁海明. 原始数据压缩对星载 SAR/GMTI 系统测速影响研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(6): 1321-1326.
- [11] 祁海明, 禹卫东. 基于实测数据的原始数据压缩对 InSAR 系统测高影响研究[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(11): 2693-2697.
- [12] 仇晓兰, 雷斌, 葛蕴萍, 等. SAR原始数据两种量化压缩方式的性能评估[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(9): 2268-2272.
- [13] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005: 169-221.
- [14] Franceschetti G, Pascazio V, and Schirrinzi G. Processing of signum coded SAR signal: theory and experiments[J]. *IEE Proceedings-F*, 1991, 138(3): 192-198.
- [15] Alberti G, Franceschetti G, Pascazio V, et al. Time-domain convolution of one-bit coded radar signals[J]. *IEE Proceedings-F*, 1991, 138(5): 438-444.
- [16] Watson G N. A Treatise on the Theory of Bessel Functions[M]. Second edition. London: Cambridge University Press, 1922: 38-84.

李 信: 女, 1985 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 数据压缩技术.

祁海明: 男, 1980 年生, 助理研究员, 研究方向为 SAR 数据压缩技术及 SAR 系统设计.

华 斌: 男, 1984 年生, 助理研究员, 研究方向为 SAR 数据压缩技术.

雷 宏: 男, 1963 年生, 研究员, 研究方向为微波天线技术及 SAR 系统设计.

禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 研究方向为 SAR 系统设计与 SAR 信号处理技术.